氷上のサイクリックステップ

— 火星北極冠のスパイラルトラフとアナログ実験 —

横 川 美 和*

Cyclic Steps on Ice: Spiral Troughs on Mars' North Polar Ice Cap and Analogue Experiments

Miwa YOKOKAWA*

[Received 30 November, 2015; Accepted 22 December, 2015]

Abstract

Spiral troughs are known to exist on the polar ice caps of Mars. The formative conditions of the troughs, which should be affected by Martian climate processes, have been sources of much debate. Recently, they have been interpreted to be cyclic steps formed by katabatic winds blowing over the ice. Cyclic steps are spatially periodic bedforms observed on relatively steep slopes, characterized by regular upstream-migrating steps delineated by hydraulic jumps. They are relatives of upstream-migrating antidunes. Boundary waves often form at the interface between ice and fluid flowing adjacent to it. Examples include ripples on the underside of a river ice cover and steps on the bed of a supraglacial meltwater channel. Waves on ice may also be formed by wind, such as megadunes observed on the Antarctic ice sheet. There have been, however, few experimental studies on the formation of either cyclic steps or upstream-migrating antidunes on ice. The first part of this paper introduces features of spiral troughs on Mars' North Polar ice cap and recent hypotheses interpreting spiral troughs as cyclic steps created by katabatic winds. The cyclic step framework can explain trough initiation, migration, and all of the major physical characteristics of spiral troughs. The latter part of this paper introduces an analogue experiment on the formation of cyclic steps on ice by flowing water, with the aim of understanding the process whereby spiral troughs are formed on Mars' ice caps. Trains of steps form when the Froude number is larger than a value around unity. The features of those steps allow them to be identified as ice-bed analogs of cyclic steps in alluvial and bedrock rivers. Moreover, the results of experiments fall into a region where a linear stability analysis predicts interfacial instability.

Key words : Mars' North polar ice cap, spiral troughs, ice, cyclic steps, analogue experiments

キーワード : 火星北極冠, スパイラルトラフ, 氷, サイクリックステップ, アナログ実験

I. はじめに

水の流れや風が砂礫床や岩盤に作用することによって、リップル（砂漣）・デューン（砂堆）・ア

ンティデューン（反砂堆）・サイクリックステップ、あるいは砂丘といった周期的な波状地形が形成されることはよく知られている（図1）。こうした地形は、水流や風などの流体と砂礫床・岩盤

* 大阪工業大学情報科学部

* Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Osaka, 573-0196, Japan

図 1 開水路で一方向流によって砂床に発達するベッドフォーム。流れはいずれも右から左。(a) リップル。福井県尾添川。リップルの波長は 10 ~ 20 cm。(b) 上流へ進行するアンティデューン(遡上反砂堆)。(c) 下流へ進行するアンティデューン(流下反砂堆)。(d) サイクリックステップ。(b) ~ (d) は大阪工業大学情報科学部に撮影。

Fig. 1 Bedforms formed by a unidirectional flow in open channels. Flow is from right to left in all panels. (a) Current ripples in a natural river, Ozoe-River, Fukui Pref., Japan. Wavelengths range from 10 to 20 cm. (b) Upstream-migrating antidunes. (c) Downstream-migrating antidunes. (d) Cyclic steps. Photos (b)–(d) were taken at Osaka Institute of Technology.

との相互作用によって、その境界面に侵食・堆積が起こり、結果として自己組織化的に形成されるものである。サイクリックステップについては、最近の 15 年間ほどで研究が進んできた（たとえば、Parker and Izumi, 2000; Taki and Parker, 2005; Yokokawa *et al.*, 2011; Cartigny *et al.*, 2014）。サイクリックステップはフルード数の高い流れによって形成される周期的なステップ地形で、上下端を跳水で仕切られており、砂床の場合はこの跳水を保ったまま一定の波長を維持した状態で上流へ進行する（図 1d）。サイクリッ

図 2 氷上に形成された波状地形。(a) 結氷河川の河水の裏側にみられる「リップル」(ice ripples)。Carey (1966) より。(b) 氷河の上を流れる融水によって形成された氷のステップ。L. Karlstrom 提供。

Fig. 2 (a) Ice ripples formed on the underside of ice covering the water surface of a river (from Carey, 1966). (b) Ice steps formed in a channel on the surface of glacier ice (courtesy L. Karlstrom).

クステップは岩盤（泉ほか, 2012）、粘着性土壌（Parker and Izumi, 2000）、砂床（Taki and Parker, 2005）などさまざまな底質で形成される。また山地河川、沖積河川、深海の海底谷沿い（たとえば、Migeon *et al.*, 2000; Fildani *et al.*, 2006）などさまざまな環境でみられることがわかっている（Kostic *et al.*, 2010 に詳しいレビューがある）。砂床河川などでみられるサイクリックステップは堆積物が移動・堆積する輸送的・堆積的なものであるのに対して、岩盤河川や粘着性土壌に発達するサイクリックステップは侵食的なものである。両者は流れの性質の点でよく似通っており、侵食された底質が再び堆積するか、運び去られてしまうかだけが異なる。

同じような周期的な波状地形が氷の表面にも形成される。たとえば結氷河川の河水の裏側のリップル様構造（たとえば、Carey, 1966 : 図 2a）、氷河上の融水流によるステップ状構造（図 2b）、南極氷床のメガデューン（たとえば、Fahnestock *et al.*, 2000; Frezzotti *et al.*, 2002）などが地球上では知られている。さらに、火星の北極冠・南極冠にはスパイラルトラフと呼ばれる螺旋状の地溝（口絵 2）があることが知られているが、これらは最近の研究（Smith *et al.*, 2013）によって、冠

上を吹くカタバ風（滑降風：katabatic wind）によって形成されたサイクリックステップであろうと推定されている。これらは氷の上（または下）を流れる流体と氷の相互作用によってその境界面に自己組織化的に形成されるものである。ただし砂床上の地形は碎屑物の侵食、運搬、堆積作用によってつくられるものだが、氷床の形状は融解・凍結作用によって形成されているという点で異なっている。あえて誤解を恐れずに直感的な表現をするとすれば、流体が砂を運ぶかわりに熱フラックスを運んでおり、流体と氷表面での熱フラックスのやりとりが侵食（融解）・堆積（凍結・着霜）をもたらしている、と理解できよう。氷上の界面波形成に関する理論解析においても、その定式化の基本的な構造は砂床に対するそれと同じで、流体の記述にナビエ・ストークス方程式を用い、流砂の方程式のかわりに熱伝導の方程式を用いている（泉, 2016：本特集号）。

砂礫床の上や岩盤上に形成される波状地形については、理論・実験・野外調査ともに古くから多くの研究が行われているが、氷表面の波状地形についての研究は限られている。火星の極冠にみられるスパイラルトラフの形成過程を理解することは、火星の大気の状態、すなわち火星の気候を理解する際に役立つであろう。筆者らは近年、火星北極冠のスパイラルトラフの形成過程を理解することを目指して、氷と流体の界面に発達するサイクリックステップについての理論解析とアナログ実験を行ってきた（泉ほか, 2013; 横川ほか, 2013; 内藤ほか, 2015; Yokokawa *et al.*, submitted）。本稿では、火星北極冠のスパイラルトラフについて、形態や内部構造とそれがサイクリックステップであると推定される根拠などについて紹介し、さらに氷上に流体（水）によって界面波を形成したアナログ実験について紹介する。なお、流体による氷上の界面波形成の理論解析については本特集号の泉（2016）で解説されているので、それを参照されたい。

II. 火星北極冠のスパイラルトラフ

火星の北極と南極には、厚さ 3 km、直径 1000 km

程度（地球のグリーンランド氷床に相当する大きさ）の氷床があることが知られている（2003 年までの研究については東（2004）による日本語の好レビューがある）。この極冠はおもに氷にダストが混じったものから構成されており、表面は季節的に拡大・縮小する厚さ 1 ~ 2 m の CO₂ の氷に覆われている。地球のグリーンランド氷床や南極氷床と決定的に違うのは、その成分と表面に刻まれた螺旋状の深い溝構造（spiral trough：スパイラルトラフ）である（口絵 2, 図 3a）。1971 年の Mariner 9 号による発見以来、このスパイラルトラフの成因について多くの議論が行われてきた。トラフの断面では数 m ~ 数十 m の厚さの堆積層が重なっている様子がみられるため、NPLD（North Polar Layered Deposits：北極冠層状堆積物）あるいは SPLD（South Polar Layered Deposits：南極冠層状堆積物）と呼ばれている。さらに 2005 年に打ち上げられたマーズ・リコネッサンス・オービター（Mars Reconnaissance Orbiter）に搭載されたレーダー（SHARAD: Shallow Surface Radar）によって極冠の内部構造が明らかになると、それは地球の南極氷床などの内部構造とまったく異なることがわかった。南極氷床は全体が徐々に変形・流動した構造を示すのに対して、スパイラルトラフの内部構造はあたかもベッドフォームが移動し堆積物が積もって形成されたかのような構造である（Smith and Holt, 2010）。スパイラルトラフは火星の両極冠でみられるが、ここではより構造がはっきりとしており研究が進んでいる北極冠のスパイラルトラフについて紹介する。

1) 北極冠のスパイラルトラフの特徴

スパイラルトラフは時計回りに曲がった溝（以下、トラフ）の列で構成されており（Howard, 2000）、トラフの深さは極の近くではおよそ 400 m、北極冠の縁近くでは最大 1000 m 以上に達することもある（Pathare and Paige, 2005）。トラフからトラフまでの波長は 20 ~ 70 km で、また 1 つのトラフの長さは少なくとも数百 km におよぶ（Howard, 1978; Cutts *et al.*, 1979）。トラフを囲む壁は高い側（多くは極に近く、赤道に面した

図 3 火星北極冠層状堆積物 (NPLD) の表面とトラフのイメージ. Smith *et al.* (2013) を改変. (a) MOLA 高度データ (Smith *et al.*, 2001) から得られた NPLD の表面の陰影図. 以後の図で用いられるイメージの位置を示している. (b) 火星年 29 の Ls100.4 に得られた CTX イメージ (P21_009266_2729_XN_87N307W) の一部. トラフの典型的な例で、侵食により露出した低アルベドの層、中間的なアルベドを示す縞状部分、そしてトラフとトラフの間の高アルベドの部分 (画像の上部と下部) がみえる. 層状構造がみえるトラフの高壁は、風による昇華と物理的な移動によって侵食されたものである. 縞状構造がみえる低壁には薄い羽毛状の堆積物が堆積しており、下流方向のトラフ間の部分にオーバーラップしている.

Fig. 3 NPLD surface and trough image. Modified from Smith *et al.* (2013). (a) Shaded-relief NPLD surface from MOLA elevation data (Smith *et al.*, 2001) showing the morphology of troughs and footprints of figures for context. (b) Portion of CTX image P21_009266_2729_XN_87N307W taken during Mars year 29 at Ls 100.4. Archetypal trough displays low-albedo eroded layers, medium-albedo banded terrain, and high-albedo intertrough regions (top and bottom of image). Exposed layers on the trough high side are the results of sublimation and mechanical removal by wind. Banded areas on the trough low side exhibit thin feathery deposits that onlap intertrough region.

側：以下「高壁」と低い側（極から遠く、極に面した側：以下「低壁」とでは、アルベドや表面組織そして斜面勾配が異なる。高壁は層状構造を示し、もっともアルベドが低い (Cutts *et al.*, 1976; Ng and Zuber, 2006)。このことはダストの割合が比較的高いことを示している。低壁の方は縞状の構造を示し、トラフとトラフの間の高地（アルベドがもっとも高い）と高壁との中間的なアルベドを示す (Howard *et al.*, 1982) (図 3b)。傾斜については、高壁は $2^{\circ} \sim 15^{\circ}$ で、極から離れるほど急になる。低壁はつねに対となる高壁よりも小さな傾斜を示す (Pathare and Paige, 2005)。

マーズ・リコネッサンス・オービターに搭載された SHARAD は短波帯 (15 ~ 25 MHz) のレーダーで、地下およそ 1 km 程度までの砂・岩石・氷の構造を深さ方向 10 ~ 20 m の精度で捉えることができる。このレーダーによる NPLD の反

射面を解析すると、まず NPLD の下部（全体の $1/2 \sim 2/3$ ）では北極冠の表面は比較的スムーズで、トラフがまだ発達していなかったこと (口絵 2)、北極冠形成の後半でトラフの形成がはじまり、それ以来、トラフは北へ（極方向へ）進行しながら堆積している特徴を示すことがわかった (Smith and Holt, 2010; 図 4)。現在のトラフの底から氷のなかに向かって斜面下方に伸びる不連続面があり、これはトラフが移動した軌跡 (TMPs: trough migration paths) と解釈できる。TMPs のマッピングから, Smith and Holt (2010) は、もっとも古い Chasma Boreale の近くのトラフは、およそ 1000 m 堆積する間に $90 \sim 100$ km 移動しており、比較的若い 90°E 付近のトラフはおよそ 360 m 堆積する間に $15 \sim 25$ km 移動していると推定している。

2) スパイラルトラフ＝サイクリックステップ説

上述の SHARAD の反射面による内部構造は、

驚くべきことに、地球の海底谷沿いの自然堤防上に発達するセディメントウェーブの内部構造と同じ、流れの上流方向（火星の場合は極の方向）に進行しつつ上方へ累重する構造を示していた（図5）。海底谷の自然堤防は混濁流の溢れ出しによって発達したもので、溢れ出した混濁流がセディメントウェーブを形成していることが多い。近年、その多くがサイクリックステップであろうと解釈されるようになった（たとえば、Migeon *et al.*, 2000; Fildani, *et al.*, 2006）。この「堆積構造」の類似性から、火星極冠のスパイラルトラフもサイクリックステップであるという仮説が生まれた。サイクリックステップは、I章で述べたように、フルード数の高い流れによって形成されるベッドフォームで、上下端に跳水を伴い、ステップは上流へ向かって進行する。

現在の火星では氷床の上を液体（の水）が流れているわけではなく、これらの「堆積構造」を形成する営力としてカタバ風が考えられる。それを裏づけるのが、トラフの低い部分で発生する雲である。2001年に打ち上げられたマーズ・オデッセイ（Mars Odyssey）に搭載された熱放射撮像カメラ（THEMIS: The Thermal Emission Imaging System）による画像には、火星の晩春から夏にかけて、トラフとほぼ平行に伸びる雲がみられる（以下、トラフ雲：Smith *et al.*, 2013）。トラフ雲はトラフの底の低壁に近いところで発生しており、このトラフに平行な雲がある時には、高壁を下るような筋状の雲もみられる（図6）。トラフ雲が現れる季節はCO₂の水にとっては暖かすぎるので、雲は水の氷でできている可能性が高い。これらの雲はかつてダストの巻き上げによる雲であると推測されたこともあった（Warner and Farmer, 2008）が、Smith *et al.* (2013) はトラフと直交して発達している雲も発見しており、雲の形状からそちらがダスト雲である可能性が高いと指摘している。

地球の南極氷床の勾配の変換点の上空では、しばしば長く伸びた雪雲（Lied, 1964）が発生する。この特徴的な雲は氷床の斜面を下降するカタバ風の“katabatic jumps”（Loewe effect と呼ば

れる）に伴って発生し、その場所でまるで壁のように降雪が起こることが知られている（Pettré and André, 1991）。Lied (1964) や Pettré and André (1991) は katabatic jumps を「狭い区間で、水平的に風速、気圧、気温が大きく変化すること」と定義しており、katabatic jumps を挟んで風速と温度は減少し、気圧と流れの厚さが増加する。Pettré and André (1991) が 1985 年 12 月 3 日に南極のアデリーランドで行った観測では、katabatic jump の前と後で流れの厚さは 400 m から 1250 m に変化し、斜面方向の平均風速は 22.5 ms^{-1} から約 6 ms^{-1} に変化したと報告されている。

火星のトラフ雲はこれと似た現象であろうと Smith *et al.* (2013) は考えている（図7）。THEMIS の画像の解析から、火星北極冠のスパイラルトラフでのカタバ風の継続時間はおよそ 10 時間くらいと見積もるのが妥当と考えられている（Smith *et al.*, 2013）。ほとんどの雲は一枚のイメージにしか写っていないが、火星年 29 の Ls84.66–87.98（Ls90 が夏至）では、北緯 86° のイメージすべてにトラフに平行な雲が写っているという。この 200 時間以上におよぶ例外的なイベントは、火星年 6 年間におよぶ観測のうち、この 1 回しか発見されていない（Smith *et al.*, 2013）。こうした何年かに一度の大きなイベントが、反射面として残るのかもしれない。

スパイラルトラフの形成に関してはこれまで多くの仮説が提唱されてきた。トラフの形成自体に関しては、アルベドの違いによって昇華度合いが異なること（Ivanov and Muhleman, 2000）、横方向の熱の拡散（Pelletier, 2004）、風による侵食（Kolb and Tanaka, 2001; Rodriguez and Tanaka, 2011）などが提唱されている。また、氷塊が流れること（とコリオリ力）による応力により割れ目が生じてトラフが形成される説（Weijermars, 1986; Zeng *et al.*, 2008）、コリオリ力の影響を受けて渦巻き状に吹く風がダストを渦巻き状に分布させスパイラルトラフの形成がはじまるという説（Ng and Zuber, 2006）などもある。これら従来の仮説はスパイラルトラフのさまざまな特

図 4 (Fig. 4)

図 5 (Fig. 5)

徴の一部を説明することはできても、形成のきっかけやトラフの形状、アルベドの分布、内部構造にいたるまで Smith *et al.* (2013) があげているスパイラルトラフ形成の仮説を検証するための 10 項目の基準すべてを矛盾なく説明することはできなかった。

図 6 (Fig. 6)

図 7 (Fig. 7)

Smith *et al.* (2013) があげた 10 項目の基準は以下のようなものである。すなわち、(1) 初期トラフの形成、(2) 北極冠と南極冠で反対の向きを示す大規模な渦巻き (Cutts, 1973)、(3)

赤道向きの壁でみられる摩耗とそれによって露出する低アルベド層 (Warner and Farmer, 2008), (4) 極向きの壁を覆う堆積物とそれが示す中間

的なアルベド (Howard *et al.*, 1982), (5) SHARAD の画像で反射面にずれがあること (Smith and Holt, 2010), (6) トラフの断面での非対称

図 4 SHARAD レーダーによるスパイラルトラフの断面の一部. Smith *et al.* (2013) より転載. (a) トラフの内部構造によって, スパイラルトラフが上流進行していたことがわかる. (b) (a) と同じ場所で, トラフが移動した跡 (TMP: オレンジ) を示した解釈図. また, 2つの反射面をトレースすると (黄色), 場所によって厚さが変化している事がわかる (Smith and Holt, 2010). トラフはもっと低く南に位置していたものが, 北方向への進行と累重によって現在の位置に移動したことがわかる. 場所によって厚さが異なることは, サイクリックステップが移動していることを示唆している. 位置は図3参照. 縦方向に 80 倍強調.

Fig. 4 Portion of SHARAD radargram 1294501 crossing spiral troughs. From Smith *et al.* (2013) with permission. (a) Stratigraphy associated with spiral trough migration is visible beneath the troughs. (b) Same as Figure 4a with interpretation of reflectors indicating Trough Migration Paths (TMP; orange) and thickness variations between reflectors (yellow) positively correlated across the TMPs (as in Smith and Holt, 2010). Troughs were originally located at a lower position and farther south, and have risen during accumulation and northward migration. Asymmetric thickness across TMP boundary indicates ice transport as described by the cyclic step model. Location indicated in Fig. 3. Vertical exaggeration $\sim 80\times$.

図 5 堆積的なサイクリックステップの内部構造. Smith *et al.* (2013) より転載. (a) イタリアの北西の大陸斜面に近い Var リッジの音波探査イメージ (Migeon *et al.* (2000) を改変). 反射面が途切れているところは少なく, セディメントウェーブの上流進行が明らかにみとれる. 反射面間の厚さの変化も顕著に現れている. (b) NPLD のスパイラルトラフの SHARAD レーダーデータ 598301 の一部. レーダーの反射面のパターンは (a) の深海のセディメントウェーブの内部構造と似ている. 位置は図3参照.

Fig. 5 Stratigraphy of depositional cyclic steps. From Smith *et al.* (2013) with permission. (a) Seismic image of sediment waves near continental slope at Var sedimentary ridge in northwest Italy (reproduced with permission from Migeon *et al.*, 2000). Layers are truncated at only a few spots, but upslope migration is clearly evident. Layer thickness variations are also readily apparent. (b) Portion of SHARAD radargram 598301 near spiral troughs on the NPLD. Displayed stratigraphy has similar patterns to submarine sediment waves in (a). Location indicated in Fig. 3.

図 6 筋状雲を伴うトラフ雲. Smith *et al.* (2013) より転載. (a) 火星年 27 の Ls90.6 に撮られた THEMIS VIS image V12295001 の一部. 風は高壁側(左)から斜面を加速しながら下り, トラフ底にたつする(白い X 印は, その近辺でもっとも低い部分を示す). (b) (a) の断面図. 黒い X 印は高度が低いところを表し, (a) の白い X 印と対応している. 位置は図3参照.

Fig. 6 Trough cloud with linear streaks. From Smith *et al.* (2013) with permission. (a) Portion of THEMIS VIS image V12295001 taken during Mars year 27 at Ls 90.6. Winds enter the trough from the high side (left). The flow accelerates downhill toward the trough bottom (white Xs indicate local minimum elevations). (b) Topographic profile of vertical line in (a). Black Xs mark lowest elevations in the trough and correspond to White Xs in (a). Location given in Fig. 3.

図 7 火星北極冠のスパイラルトラフがカタバ風によるサイクリックステップによって形成される概念図. Smith *et al.* (2013) をもとに作成. 風は高壁側からおりてきて加速する. 高壁沿いでは風によって昇華が促進される. katabatic jump の場所で流れの厚さは急速に増加し, それによって生じた雲の下で降雪または着霜が起こる(低壁沿い). 黄線はある反射面を繋いだもの. オレンジ線は TMP に相当. 高壁側での露出層と低壁側での堆積は, トラフの移動によって累重が非対称的に生じていることをよく表している.

Fig. 7 Cartoon of formation of cyclic steps by katabatic wind. Depicted based on Smith *et al.* (2013). Wind enters the trough from the high side and accelerates downhill, where sublimation enhanced by wind. Flow depth increases quickly at the site of a katabatic jump, and deposition begins beneath a cloud as snow or frost at low side. Yellow depicts one stratigraphic level in the section. Orange correlates TMP. Exposed layers on the high side and mantling associated with deposition depict asymmetric accumulation as the cause of migration.

的な氷の堆積 (Smith and Holt, 2010), (7) 赤道向きの壁がつねに極向きの壁より傾斜が急なことで (Pathare and Paige, 2005), (8) 場所によってトラフの波長が異なること (Pathare and Paige, 2005; Smith and Holt, 2015), (9) SHERAD に画像で明らかになった NPLD トラフの上流進行 (Smith and Holt, 2010), (10) SPLD ではトラフは移動していないとされること (Kolb and Tanaka, 2001), である。従来の仮説はスパイラルトラフのさまざまな特徴の一部を説明することはできても、形成のきっかけやトラフの形状、アルベドの分布、内部構造にいたるまで Smith *et al.* (2013) があげている上述の 10 項目の基準すべてを矛盾なく説明することはできなかった。これに対して、Smith *et al.* (2013) は NPLD を堆積的なサイクリックステップ、SPLD を侵食的なサイクリックステップのモデルで説明すると、すべての基準項目を説明することができるとしている。

III. 氷床上の界面波形成に関するアナログ実験

1) 既存研究

水と流体の界面に発生する界面波について、いくつかの例が知られている。早期の研究としては Carey (1966, 1967) が冬季の結氷河川の表面を覆う氷の裏側にリップル様の構造を観察している (図 1a)。河川の表面の温度が氷点より下がって凍ると、はじめは平らな界面にその下の水の流れとの相互作用によって波状の凸凹が形成される。その後、簡単な線形安定解析と開水路 (Ashton and Kennedy, 1972)・管路 (Gilpin *et al.*, 1980) によるアナログ実験が行われ、平らな水-氷の界面は条件によって不安定になりリップル様の界面波が発生し、それらが下流へ進行することが示された。一方、Fuhs *et al.* (1980) はカリフォルニア州モンテレイ湾内で氷塊を船で曳航し、氷の裏にリップルができることを報告している。また最近、Camporeale and Ridolfi (2012) は詳細な安定解析を行って、最低限の前提条件で自由表面をもつ流水と氷との界面でのリップル構造の形成を説明することに成功している。彼らは界面の不安定 (波状構造の形成) は層流条件でも起こりう

ることを示しており、氷上の界面波を形成するのに必ずしも乱流は必要ないことがわかっている。

そのほかには、比較的急な勾配の氷河の表面に融水流によってステップ状の波状構造ができることも知られている (図 1b)。この場合もはじめは平らだった流れ-氷の界面が不安定になり界面波が形成されるのであるが、斜面の勾配が急な場合は、両端が跳水で区切られた周期的なステップ地形、すなわちサイクリックステップが形成されている。こうしたサイクリックステップが水流ではなく風で形成されることもある。前章で紹介した火星の極冠にみられるスパイラルトラフのほか、地球の南極氷床上で観測されているメガデューン (Fahnestock *et al.*, 2000; Frezzotti *et al.*, 2002) の一部は、同じく南極氷床上を吹くカタバ風によって形成されたサイクリックステップと考えられる。

上述のように、これまでのところ氷表面に形成されるリップル構造については理論解析やアナログ実験が行われているが、高流砂階で形成されるアンティデューンやサイクリックステップについては Camporeale and Ridolfi (2012) が詳細な安定解析によって界面の不安定 (波状構造) が上流進行することを示した理論的研究があるのみで、アナログ実験は行われていなかった。次節では、筆者らが氷上にステップ地形を形成した実験 (横川ほか, 2013; Yokokawa *et al.*, submitted) を紹介する。

2) 氷上に形成されるステップ地形についてのアナログ実験

2-1) 実験方法

この実験では氷の上を流れる流体として水を使った。氷、氷の上を流れる流体、周囲大気との関係は、火星北極冠でのスパイラルトラフ形成においても地球の氷河上でのステップ地形形成においても、氷<氷の上を流れる流体<周囲大気であると推定される。実験ではその関係を保つように、氷を 0℃ 以下、流体 (水) を 0.2 ~ 2℃ 程度、室温を 5℃ 程度に維持した。

実験は北海道大学低温科学研究所の低温実験室で行った。この実験室は部屋全体が冷凍機か

ら出る冷氣によって冷やされ、 $-20^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ の範囲で室温をコントロールできる。実験装置は、アクリル製の水路（長さ 180 cm，幅 2 cm，深さ 20 cm）と水路冷却装置および流体を循環させるタンクとポンプ，流体用のヒーター・冷却装置からなる。水路には上流端から 30 cm の地点と下流端に高さ 8 cm の堰があり，この間に水を張って凍らせることによって，厚さ 8 cm，長さ 150 cm の氷床をつくることができる。冷却装置は水路底を氷点以下に保つためのものである。長さ 184 cm，高さ 8 cm，幅 16 cm の塩化ビニール樹脂製のタンクのなかに恒温循環装置から -17°C 程度に冷やしたエチルアルコールを循環させた。これによりタンク表面は -10°C 程度に保たれており，この上に水路を設置した。氷の上に流す流体（水）はヘッドタンクから水路に導かれ，氷床上を流れる。その後流体は下部タンクに入り，ポンプでヘッドタンクに戻る。液温を目標温度に保つために，ヘッドタンク内に投げ込み式冷却器とサーモスタット付のヒーターを設置した。

水深は，流体を流しはじめた直後，まだ氷床表面が平らなうちに定規で 10 cm ごとに測り，その平均を初期平坦床水深とした。室温・流体の温度・水路冷却タンク表面の温度は温度計で連続測定し，さらに氷内部の温度を，あらかじめ氷作成時に水路壁に仕込んだ熱電対によってモニターした。

2-2) 実験結果

8 ケースの実験を行った。前節で述べたように室温は 5°C 程度だが，1 ケースのみ室温を平均 9.3°C に保ったケースがある。水路勾配は 0.9° ， 5° ， 20° ，流量 $7.60 \sim 77.90 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ，平坦床水深 $1.5 \sim 5.7 \text{ mm}$ ，フルード数 ($Fr = U_a / \sqrt{gH_0}$: U_a は水深方向平均の流速， g は重力加速度， H_0 は平坦床水深) $0.76 \sim 5.04$ の範囲で実験を行った。レイノルズ数 ($Re = U_a H_0 / \nu$: ν は動粘性係数) は 1 ケースを除き，750 以下で層流条件であった。実験時間はおおむね 4 時間程度である。 $Fr = 0.76$ の時にはステップはできなかったが，それ以外 ($Fr \geq 1.15$) のケースでは氷床の上にステップ地形が形成された。ステップの形状と発達過程

図 8 アナログ実験で氷上に形成されたサイクリックステップの例。実験番号，初期平坦床水深，平均波長は，(a) CSIM120908A，2.05 mm，45 cm，(b) CSIM120913A，2.29 mm，47.3 cm，and (c) CSIM120911B，5.70 mm，125 cm である。

Fig. 8 Examples of steps formed in the experiments. Run No., initial flow depth, and average wavelength are (a) CSIM120908A, 2.05 mm, 45 cm, (b) CSIM120913A, 2.29 mm, 47.3 cm, and (c) CSIM120911B, 5.70 mm, 125 cm, respectively.

について次に述べる。

実験終了時の写真からステップの波長と波高を測定した。波長・波高ともに 1 つの条件のなかでもばらつきがあるが，算術平均を求めた。この平均波長は，初期平坦床水深が深いほど波長が長い傾向がある（図 8）。

ステップの凹みの形状に注目すると，凹みの上流側斜面はゆるく，下流側斜面は傾斜がきついケースが一般的である。流れはこのゆるい斜面で水深が浅く射流状態で流れ下り，跳水を起こして常流となる。この時，ゆるくて浅い方の斜面の拡大速度（融解速度）が大きい。これは，より温度の高い周囲大気の影響を受けやすいためと考えられる。上記とは反対に下流側斜面がゆるい凹みがみられることもあるが，時間が経つにつれて，上流側斜面がゆるくなっていくことが多い。したがって，多くの場合，時間の経過とともにステップが上流側に拡大していく。

複数のステップができる場合，実験開始時の氷表面が平坦で凸凹がない場合は，下流端がきっかけとなつてまずはじめに下流端付近にス

テップができる (図 9 (2))。それが大きくなるにつれて、上流側にステップが発達しはじめる (図 9 (3) ~ (4))。そのステップが大きくなると (図 9 (5) ~ (6))、さらに上流側にステップができる (図 9 (6) ~ (8)) ということが繰り返され、水路全体に周期的なステップが発達する。ただし氷表面に凹凸や割れ目があった場合は、それをきっかけとして氷表面の侵食がはじまることが多く、必ずしも下流端からステップの形成がはじまるとは限らない。

2-3) 砂床地形との比較

II 章 1) 節で述べたように、氷-流体の界面にできる波状構造についてはリップル様構造のほかには実験的研究がなく、呼称さえないのが現状である。実験で形成された氷上の波状構造をどのように位置づけるか、今後も検討を続けていく必要がある。Ice ripples (図 2a) の形態が砂床のリップル (図 1a) ときわめてよく似ていることや、理論上は流砂の方程式を熱伝導の方程式を用いて界面波の発達を予測できることを考えると、流体の流れによって砂床の砂が運ばれるかわりに熱が運ばれ、そのバランスによって「堆積」：凍結や「侵食」：融解が起きていると、比喩的に理解できるのではないかと考えられる。砂床波と氷上の波状地形を直接比較することが可能かどうかについてはさらなる議論が必要であるが、Yokokawa *et al.* (submitted) では試みとして、砂床の高流砂階のベッドフォームとこの実験でできたステップ状地形の形態の比較をしている。界面波の比較のために、砂床のベッドフォームの研究でよく用いられる (たとえば, van Rijn, 1984; Julien and Klaassen, 1995) 次の 2 つのパラメータを用いる。すなわち、波形勾配 η/L と無次元波数 $\alpha = 2\pi H_0/L$ である。ここで L は界面波の波長、 η は波高、 H_0 は平坦床水深 (流れの厚さ) である。

砂など粘性がない底質では、フルード数が 1 より大きい領域で、上流進行する遡上反砂堆 (図 1b)、下流進行する流下反砂堆 (図 1c)、上流進行するサイクリックステップ (図 1d) が観測されている (たとえば, 福岡ほか, 1982; Yokokawa *et al.*, 2011)。Yokokawa *et al.* (2011) では、こ

図 9 ステップの形成過程 (実験番号 CSIM120908A). 実験開始より (1) 30 分後, (2) 60 分後, (3) 90 分後, (4) 120 分後, (5) 150 分後, (6) 180 分後, (7) 210 分後, (8) 234 分後. 流れは左から右. (9) は氷の表面を 30 分ごとにトレースしたもの. 右端の数字 0 は通水前, 1 ~ 8 は (1) から (8) に対応する.

Fig. 9 Development process of steps. (Run No. CSIM 120908A). (1) 30 min., (2) 60 min., (3) 90 min., (4) 120 min., (5) 150 min., (6) 180 min., (7) 210 min., (8) 234 min. subsequent to run initiation. Flow is left to right. (9) Line drawings of ice surface for every 30 minutes. 0 shows the initial ice bed, and 1-8 corresponding to (1)-(8).

これらの砂床形と水面波の形態および水理条件との関係を詳しく述べている。それによれば、反砂堆は水面波と砂床波が同位相を示すことが特徴である。水面波と砂床波の振幅の相違によって、砂床波が上流へ進む場合（遡上反砂堆）と下流へ進む場合（流下反砂堆）がある。遡上反砂堆の多くは周期的な碎波を伴う。サイクリックステップはステップの上下端を仕切る跳水がつねに存在するのが特徴である。上記の三者を明示的に記載している開水路実験結果（福岡ほか, 1982; Alexander *et al.*, 2001; Taki and Parker, 2005; Bregoli, 2008; Recking *et al.*, 2009; Núñez-González and Martín-Vide, 2010; Yokokawa *et al.*, 2011）から波形勾配と無次元波数を計算してプロットすると、流下反砂堆はより大きな波形勾配（0.02～0.2程度）と無次元波数（0.2～2.0程度）を示す。遡上反砂堆は中間的な無次元波数（0.09～0.9程度）を示し、細粒砂を用いた実験では波形勾配が小さい（0.01程度）が、細礫～中礫を用いた実験では中程度の波形勾配（0.03～0.1程度）を示す。これらに対して、サイクリックステップでは、波形勾配は中程度（0.02～0.09程度）であるが、無次元波数が小さい（およそ0.08以下）ことが特徴である（図10）。上述の実験で得られた氷のステップの形態は、水深に対して波長が長く、波高も高めであるのが特徴である。波形勾配は0.018～0.177、無次元波数は0.015～0.031の範囲にある。これらの値は、開水路の砂床の実験におけるサイクリックステップの領域に入る（図10）。

こうした形態的な特徴が砂床のサイクリックステップと似ていること、さらにII章2-2)節で述べたようにステップの部分で跳水がみられ、多くのステップの凹みは上流側に拡大していく特徴を鑑みて、この実験で形成された氷の波状地形は砂床のサイクリックステップに相当するものといえるだろう。

またYokokawa *et al.* (submitted) では、実験結果と理論解析の結果との比較を行っている。比較の結果、実験データは波数-Reynolds数平面および波数-Froude数平面上において界面不安定

図10 砂床のアンティデューン、サイクリックステップ、そして氷のステップの波形勾配と無次元波数。凡例はYOK: Yokokawa *et al.* (2011), FOY: 福岡ほか (1982), TP: Taki and Parker (2005), ALK: Alexander *et al.* (2001), BRE: Bregoli (2008), REC: Recking *et al.* (2009), NUN: Núñez-González and Martín-Vide (2011)。

Fig. 10 Wave steepness and wavenumbers for anti-dunes, cyclic steps, and ice waves. YOK: Yokokawa *et al.* (2011), FOY: Fukuoka *et al.* (1982), TP: Taki and Parker (2005), ALK: Alexander *et al.* (2001), BRE: Bregoli (2008), REC: Recking *et al.* (2009), NUN: Núñez-González and Martín-Vide (2011)。

が発生する領域（サイクリックステップのもととなるアンティデューンが生じる領域）にプロットされた。またステップ発達前により短い波長のアンティデューンが発生していることが明らかとなっている。これにより理論で予測された不安定がきっかけとなってステップが発達していることが実験でも示された。

IV. おわりに

本稿では火星北極冠にみられるスパイラルトラフを紹介し、その形成過程を理解するために行われた氷上のステップ地形形成のアナログ実験について紹介した。

火星の北極冠は水 H_2O の氷、ダスト、 CO_2 の氷

から構成され、その表面には波長約 20 ～ 70 km、波高 400 ～ 1000 m の周期的な構造をもつ溝が螺旋状に発達しており、スパイラルトラフと呼ばれている。近年の火星表面の高解像度の画像の解析により、北極冠上を吹くカタバ風がトラフ部分でトラフと平行な雲を発生させていることがわかり、これは katabatic jumps によるものと解釈されている。SHARAD によって得られたトラフの内部構造とあわせて考えると、スパイラルトラフはカタバ風によって形成されたサイクリックステップであると推定される (Smith *et al.*, 2013)。

一方、氷と流体の界面に界面波が発達する例は地球上でもいくつか知られていたが、氷上の界面波についての実験的研究は非常に限られていた。著者らは氷-流体の界面にサイクリックステップが形成されるかどうかを調べるために、フルード数の高い領域で水流によって氷上にステップ地形を形成するアナログ実験をはじめて行った (横川ほか, 2013)。その形態を砂床に高流砂階で形成されるベッドフォームと比較すると、この実験で形成された氷上のステップは砂床のサイクリックステップに近い形状であることがわかった。また、理論解析との比較を行って、理論が予測する形成条件にアナログ実験の結果が適合していることも確かめている (Yokokawa *et al.*, submitted)。

氷上に形成される界面波についての実験的研究はまだ緒に付いたばかりである。今後さらにさまざまな温度条件・水理条件の下での界面波の形成条件を調べることにより、火星極冠形成過程のさらに詳細な復元や、南極氷床でのメガデューンの移動予測に寄与する知見が得られるだろう。

謝 辞

本稿で紹介したアナログ実験を行うにあたり、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究 (課題番号 24654165) ならびに北海道大学低温科学研究所一般共同研究 (課題番号 No.12-59) を使用しました。また実験は、北海道大学大学院工学研究院の泉 典洋教授、同環境フィールド工学専攻河川・流域工学研究室の内藤健介、久世晴日、高橋一徳ならびに大阪工業大学情報科学部地球

環境研究室の清水裕貴、北山忠弘、場谷 徹、山本真也ら学生諸君の協力を得て行いました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- Alexander, J., Bridge, J.S., Cheel, R.J. and Leclair, S.F. (2001): Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds. *Sedimentology*, **48**, 133-152, doi:10.1046/j.1365-3091.2001.00357.x.
- Ashton, G.D. and Kennedy, J.F. (1972): Ripples on underside of ice cover of rivers. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **HY9**, 1603-1624.
- 東 信彦 (2004): 火星極地氷床の研究と探査. 日本惑星科学会誌, **13**, 175-179. [Azuma, N. (2004): Review of Mars polar science and exploration. *Journal of the Japanese Society for Planetary Sciences*, **13**, 175-179. (in Japanese)]
- Bregoli, F. (2008): Setting of an experimental flume and first experiments in gravel bed river's morphodynamics (in Italian). *Graduate thesis, Faculty of Engineering, Univ. of Florence, Florence, Italy*.
- Camporeale, C. and Ridolfi, L. (2012): Ice ripple formation at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, **694**, 225-251, doi:10.1017/jfm.2011.540.
- Carey, K.L. (1966): Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River Wisconsin. *US Geological Survey Professional Paper* 550-B, B192-B198.
- Carey, K.L. (1967): Underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin. *US Geological Survey Professional Paper* 575-C, C195-C199.
- Cartigny, M.J.B., Ventra, D., Postma, G. and van den Berg, J.H. (2014): Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: New insights from flume experiments. *Sedimentology*, **61**, 712-748. doi: 10.1111/sed.12076.
- Cutts, J.A. (1973): Wind erosion in the Martian polar region. *Journal of Geophysical Research*, **78**, 4211-4221.
- Cutts, J., Blasius, K., Briggs, G., Carr, M., Greeley, R. and Masursky, H. (1976): North polar region of Mars: Imaging results from Viking 2. *Science*, **194**, 1329-1337.
- Cutts, J., Blasius, K. and Roberts, W. (1979): Evolution of Martian polar landscapes: Interplay of long-term variations in perennial ice cover and dust storm intensity. *Journal of Geophysical Research*, **84**(B6), 2975-2994.
- Fahnestock, M.A., Scambos, T.A., Shuman, C.A., Arthern, R.J., Winebrenner, D.P. and Kwok, R. (2000): Snow megadune fields on the East Antarctic Pla-

- teau: Extreme atmosphere-ice interaction. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3719–3722.
- Fildani, A., Normark, W.R., Kostic, S. and Parker, G. (2006): Channel formation by flow stripping: Large-scale scour features along the Monterey East Channel and their relation to sediment waves. *Sedimentology*, **23**, 1265–1287, doi:10.1111/j.1365-3091.2006.00812.x.
- Frezzotti, M., Gandolfi, S. and Urbini, S. (2002): Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis. *Journal of Geophysical Research*, **107** (D18), 4344, doi:10.1029/2001JD000673.
- Fuhs, A.E., Stolfi, R., Erman, R., Clifford, W., Denner, W., Wang, P., Bourke, R. and Griffin, O. (1980): Experiments involving melting of a large ice block towed in sea water. *Cold Regions Science and Technology*, **1**, 249–264.
- 福岡捷二・奥津一夫・山坂昌成 (1982): 急勾配移動床流れにおける河床波の形状, 伝播特性. 土木学会論文報告集, **323**, 77–89. [Fukuoka, S., Okutsu, K. and Yamasaka, M. (1982): Dynamic and kinematic features of sand waves in upper regime. *Proceeding of the Japan Society of Civil Engineering*, **323**, 77–89. (in Japanese)]
- Gilpin, T., Hirata, R.R. and Cheng, K.C. (1980): Wave formation and heat transfer at an ice–water interface in the presence of a turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **99**, 619–640.
- Howard, A.D. (1978): Origin of the stepped topography of the Martian poles. *Icarus*, **34**, 581–599.
- Howard, A.D. (2000): The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits. *Icarus*, **144**, 267–288.
- Howard, A.D., Cutts, J.A. and Blasius, K.R. (1982): Stratigraphic relationships within Martian polar cap deposits. *Icarus*, **50**, 161–215.
- Ivanov, A.B. and Muhleman, D.O. (2000): The role of sublimation for the formation of the northern ice cap: Results from the Mars Orbiter Laser Altimeter. *Icarus*, **144**, 436–448, doi:10.1006/icar.1999.6304.
- 泉 典洋 (2016): 氷床上的モルフォダイナミクス. 地学雑誌, **125**, 105–119. [Izumi, N. (2016): Morphodynamics on the ice floor. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 105–119. (in Japanese with English abstract)]
- 泉 典洋・横川美和・Parker, G. (2012): 基盤岩上に形成される周期的ステップ地形. 土木学会論文集 B1 (水工学), **68**, I_955–I_960. [Izumi, N., Yokokawa, M. and Parker, G. (2012): Cyclic step morphology formed on bedrock. *Annual Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1*, **68**, I_955–I_960. (in Japanese with English abstract)]
- 泉 典洋・横川美和・内藤健介 (2013): 流れ-氷界面に発生する境界不安定現象. 土木学会論文集 B1 (水工学), **69**, I_1117–I_1122. [Izumi, N., Yokokawa, M. and Naito, K. (2013): Boundary instability generated on the flow-ice interface. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, **69**, I_1117–I_1122. (in Japanese with English abstract)]
- Julien, P.Y. and Klaassen, G.J. (1995): Sand-dune geometry of large rivers during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**, 657–663.
- Kolb, E.J. and Tanaka, K.L. (2001): Geologic history of the polar regions of Mars based on Mars Global Surveyor data II. Amazonian Period. *Icarus*, **154**, 22–39.
- Kostic, S., Sequeiros, O., Spinewine, B. and Parker, G. (2010): Cyclic steps: A phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean. *Journal of Hydro-environment Research*, **3**, 167–172.
- Lied, N.T. (1964): Stationary hydraulic jumps in a katabatic flow near Davis, Antarctica, 1961. *Australian Meteorological Magazine*, **47**, 40–51.
- Migeon, S., Savoye, B. and Faugeres, J.C. (2000): Quaternary development of migrating sediment waves in the Var deep-sea fan: Distribution, growth pattern, and implication for levee evolution. *Sedimentary Geology*, **133**, 265–293.
- 内藤健介・泉 典洋・横川美和・角田堯史 (2015): 乱流によって氷上に形成される界面波. 土木学会論文集 B1 (水工学), **71**, I_1027–I_1032. [Naito, K., Izumi, N., Yokokawa, M. and Sumida, T. (2015): Boundary waves formed on ice by turbulent flow. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, **71**, I_1027–I_1032. (in Japanese with English abstract)]
- Ng, F.S.L. and Zuber, M.T. (2006): Patterning instability on the Mars polar ice caps. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02005, doi:10.1029/2005JE002533.
- Núñez-González F. and Martín-Vide, J.P. (2011): Analysis of antidune migration direction. *Journal of Geophysical Research*, **116**, F02004, doi:10.1029/2010JF001761.
- Parker, G. and Izumi, N. (2000): Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed. *Journal of Fluid Mechanics*, **419**, 203–238.
- Pathare, A.V. and Paige, D.A. (2005): The effects of Martian orbital variations upon the sublimation and relaxation of north polar troughs and scarps. *Icarus*, **174**, 419–443.
- Pelletier, J.D. (2004): How do spiral troughs form on Mars?. *Geology*, **32**, 365–367.
- Pettré, P. and André, J.C. (1991): Surface-pressure change through Loewe's phenomena and katabatic flow jumps: Study of two cases in Adelie Land, Antarctica. *Journal of Atmospheric Science*, **48**, 557–571.
- Recking, A., Bacchi, V., Naaïm, M. and Frey, P. (2009): Antidunes on steep slopes. *Journal of Geophysical Research*, **114**, F04025, doi:10.1029/2008JF001216.

- Rodriguez, J.A.P. and Tanaka, K.L. (2011): Evidence for in-situ trough erosion in Planum Boreum, Mars. *Fifth International Conference on Mars Polar Science and Exploration*, 1323, 6015.
- Smith, I.B. and Holt, J.W. (2010): Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital rader. *Nature*, **465**, 450-453,
- Smith, I.B. and Holt, J.W. (2015): Spiral trough diversity on the North Pole of Mars, as Seen by SHARAD. *Journal of Geophysical Research, Planets*, **120**, 352-387.
- Smith, I.B., Holt, J.W., Spiga, A., Howard, A.D. and Parker, G. (2013): The spiral troughs of Mars as cyclic steps, *Journal of Geophysical Research, Planets*, **118**, 1-23, doi:10.1002/jgre.20142.
- Smith, D.E., Zuber, M.T., Frey, H.V., Garvin, J.B., Head, J.W., Muhleman, D.O., Pettengill, G.H., Phillips, R.J., Solomon, S.C. and Zwally, H.J., (2001): Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical Research*, **106** (E10), 23689-23722, doi:10.1029/2000JE001364.
- Taki, K. and Parker, G. (2005): Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part 1. Experiments. *Journal of Hydraulic Research*, **43**, 488-501.
- Van Rijn, L.C. (1984): Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, **110**, 1733-1754.
- Warner, N.H. and Farmer, J.D. (2008): Importance of Aeolian processes in the origin of the north polar chasmata, Mars. *Icarus*, **196**, 368-384, doi:10.1016/j.icarus.2007.08.043.
- Weijermars, R. (1986): The polar spirals of Mars may be due to glacier surges deflected by Coriolis forces. *Earth and Planetary Science Letters*, **76**, 227-240.
- Yokokawa, M., Takahashi, Y., Yamamura, H., Kishima, Y., Parker, G. and Izumi, N. (2011): Phase diagram for antidunes and cyclic steps based on suspension index, non-dimensional Chezy resistance coefficient and Froude number. in *Proceedings of the 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2011)*, Tsinghua University, Beijing, China, September 2011 edited by Shao, X., et al., 1789-1794.
- 横川美和・泉 典洋・内藤健介・山田朋人・Greve, R. (2013): 氷上のステップ地形に関する実験的研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), **69**, I_1129-I_1134. [Yokokawa, M., Izumi, N., Naito, K., Yamada, T. and Greve, R. (2013): An experimental study of step topography on the ice surface. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, **69**, I_1129-I_1134. (in Japanese with English abstract)]
- Zeng, Z., Putzig, N.E., Xie, H., Birnbaum, S.J., Ackely, S.F. and Liu, L. (2008): Evidence of fractures in NPLD and their significance to the formation of Martian polar spiral troughs. *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, **39**, 2179.